强流质子同步加速器涂抹注入方法研究*

黄明阳[1, 2, 3, 4]，许守彦[1, 2]，王生[1, 2]

(1. 中国科学院高能物理研究所，中国科学院，北京 100049；
2. 散裂中子源科学中心，广东 东莞 523803；
3. 中国科学院大学，北京 100049；
4. 中国科学院粒子加速物理与技术重点实验室，中国科学院高能物理研究所，北京 100049)

摘要: 空间电荷效应是强流质子加速器的核心问题之一，在注入和初始加速阶段其影响最大。采用相空间涂抹方法并优化其涂抹过程，可以有效地缓解空间电荷效应对束流注入和加速效率及发射度增长的影响。横向相空间涂抹方法可分为相关涂抹和反相关涂抹。在本文中，首先，我们对强流质子同步加速器的横向相空间涂抹方法进行深入研究，包括不同的涂抹方法和实现方式。其次，基于中国散裂中子源（CSNS）注入系统，对束流注入过程和反相关涂抹设计方案进行详细研究，深入探索实际垂直涂抹范围变小的原因和凸轨磁铁边缘聚焦效应对涂抹效果和束流动力学的影响。同时，简单介绍了在反相关涂抹机械结构基础上实现相关涂抹的方法及其对实现 CSNS 设计指标起到的关键作用。最后，根据未来加速器对不同涂抹注入方法在线切换的需求，我们提出了一种同时实现相关和反相关涂抹的新注入方案，并对其进行详细地论证、模拟和优化。

关键词: 质子同步加速器；注入；涂抹；空间电荷效应
中图分类号: O572.21+1 **文献标志码:** A **doi：**

1 引言

散裂中子源是利用强流质子加速器引出的中高能质子束流轰击重金属靶，通过散裂反应产生大量中子的大科学装置[1]。目前国际上正在运行的脉冲型散裂中子源主要包括：美国散裂中子源（SNS）[2-3]、日本散裂中子源（J-PARC）[4-5]、英国散裂中子源（ISIS）[6-7]和中国散裂中子源（CSNS）[8-10]。散裂中子源加速器属于强流质子加速器，它具有两个重要特点：空间电荷效应影响很大和束流集体不稳定性突出。采用涂抹注入方法并优化其涂抹过程可以有效地缓解空间电荷效应对束流注入、加速效率及发射度增长的影响。通过优化工作点和色品可以有效地抑制束流集体不稳定性。

收稿日期： yyyy-mm-dd; **修改日期：** yyyy-mm-dd

基金项目： 国家自然科学基金-面上项目(12075134)；广东省基础与应用基础研究基金-省市联合基金重点项目（2021B1515120021）

作者简介： 黄明阳 (1984—), 男(汉), 福建省泉州市, 特聘青年研究员, 博士, 粒子物理与原子核物理； E-mail: huangmy@ihep.ac.cn

通信作者： 黄明阳，E-mail: huangmy@ihep.ac.cn

CSNS 加速器包括一台直线加速器、一台快循环同步加速器（RCS）和两条束流传输线[11]。RCS 将小发射度的注入束流经过多圈注入并累积成为大发射度的循环束流，并将束流能量从 80 MeV 加速到 1.6 GeV，然后将束流引出来轰击钨靶。其引出打靶束流功率为 100 kW，重复频率为 25 Hz。中国散裂中子源二期（CSNS-II）加速器升级[12]内容主要包括直线加速器能量提高（至 300 MeV）、注入系统全新升级改造和 RCS 增加磁合金二次谐波腔。CSNS-II 加速器主要目标将打靶束流功率提升 5 倍，达到 500 kW。图 1 分别给出 CSNS 和 CSNS-II 布局示意图。

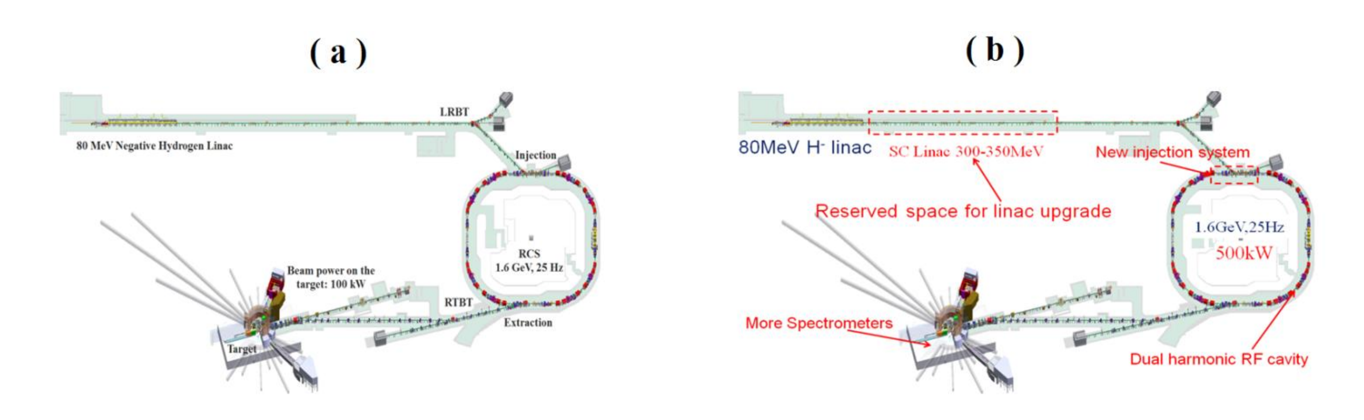


图 1（a）CSNS 布局示意图；（b）CSNS-II 布局示意图

2 注入方法和注入系统

空间电荷效应[13-14]是强流质子加速器的核心问题之一，注入和初始加速阶段其影响最大。采用相空间涂抹注入方法[15-16]，通过优化涂抹方案，可以有效地缓解空间电荷效应对束流注入和加速效率及发射度增长的影响。为了突破刘维尔定理的限制，在注入过程中需要采用负氢剥离方法[17-18]，即直线加速器加速负氢束流，在准备注入到环形加速器的过程中被剥离成质子束流，然后经过多圈注入方式进入环中。由于注入过程决定着循环束的初始状态，对束流累积过程具有重要影响，注入束流损失[19]是限制加速器能否在高功率下运行的决定性因素之一，因而，注入方法的研究、优化、调节对质子同步加速器具有重要作用，直接影响加速器能否达到设计指标和安全稳定运行。

对于强流质子同步加速器，采用相空间涂抹具有众多优势，不仅可以大幅度降低空间电荷效应的影响，增加束流累积流强，减少束流损失，而且可以明显减少束流穿越剥离膜的平均次数，降低剥离膜温升、减小剥离膜散射效应。相空间涂抹方法通常可以分为两种：相关涂抹和反相关涂抹。相关涂抹是指在水平和垂直方向上同时从中心往边缘或者同时从边缘往中心涂抹相空间椭圆；反相关涂抹是指在水平和垂直方向上分别采用相反的涂抹方向。从具体实现注入束流在环形加速器的接收相空间的涂抹还可以分为两种方式：凸轨和扫角。凸轨方法是利用四块二极磁铁组成一个凸轨，使得环形加速器中的闭合轨道在注入点处移动；扫角方法是指对注入束流在注入点处的入射角进行扫描。涂抹方法和实现方式的选择对强流质子同步加速器至关重要，直接影响注入系统的物理设计和加速器性能。

3 CSNS 涂抹注入方法

在 CSNS 物理设计阶段，对注入过程和加速过程的相关和反相关涂抹进行模拟比较研究结果表明：在名义工作点(4.86, 4.78)下，与相关涂抹相比，反相关涂抹的注入束流损失和横向耦合效应都比较小。因此，CSNS 采用反相关涂抹作为设计方案[20-22]：在水平方向采用从内到外的位置涂抹，在垂直水平方向采用从外到内的位置涂抹，水平和垂直方向均采用脉冲电源电流的下降沿曲线。图 2 给出了反相关涂抹过程中 RCS 接收度椭圆的位置变化。从图中可以看出：在注入过程中，循环束流在水平方向上由正最大值往中心移动，在垂直方向上由负最大值往中心移动，注入点位于主剥离膜的左下角。

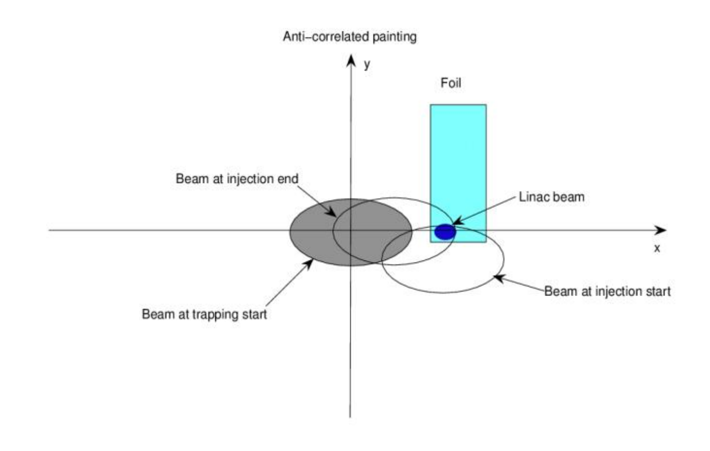


图 2 反相关涂抹过程中 RCS 接收度椭圆位置变化示意图

CSNS 注入系统主要包括：一套由四块水平脉冲型二极磁铁组成的水平涂抹凸轨、一套由四块垂直脉冲型二极型磁铁 BV 组成的垂直涂抹凸轨、一套由四块水平直流型二极磁铁 BH 组成、用于提供 60 mm 位置偏移的水平固定凸轨 BC、两块直流型切割磁铁 ISEP、一套主剥离膜系统 Str1，一套次剥离膜系统 Str2 和一个废束站。图 3 给出了 CSNS 注入系统布局示意图。

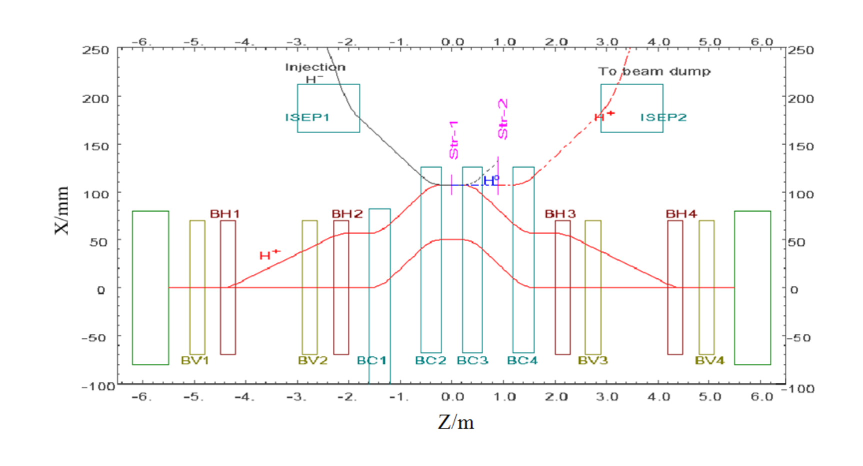


图 3 CSNS 注入系统布局示意图

3.1 束流注入

在束流注入过程中，为了确保直线加速器束流准确地注入到环形加速器中并实现高效率的束流累积，

需要进行注入定时标定和注入参数匹配。

注入脉冲电源定时设置需要与注入束流、循环束流相匹配。在束流调试过程中，我们发展了一种注入定时精确标定方法，主要包括以下步骤：（1）利用示波器从指定的束流位置探测器（BPM）采集得到标准注入定时信号(T0)、RCS 高频信号和循环束流信号，进而可以得到循环束流信号和标准注入定时信号的时间关系；（2）利用指定的 BPM 测量循环束流的逐圈（TBT）位置数据，进而可以得到脉冲电源与标准注入定时信号(T0)的时间关系；（3）通过比较这两个时间关系，可以得到循环束流信号与脉冲电源的定时关系。通过这种方法，可以对注入定时进行精确调节和标定，如图 4 所示。在图中，使用的指定 BPM (R1BPM01) 位于水平凸轨和垂直凸轨里面, R1BPM01 前 30 圈左右的 TBT 数据为干扰信号。根据机器研究结果，从图 4(a)中可以得到循环束流信号约滞后于标准注入定时信号大约 3 μs。从图 4(b)可以测量得到水平脉冲电源电流曲线（循环束一圈对应 2 μs）的注入完成时的时间点，扣除注入过程时间，可以得到水平脉冲电源定时滞后于标准定时 4 μs。因而，循环束流信号提前于水平脉冲电源定时 1 μs，水平脉冲电源定时需要往前移动 1 μs。从图 4(c)可以测量得到垂直脉冲电源电流曲线的注入完成时的时间点，扣除注入过程时间，可以得到垂直脉冲电源定时提前于标准定时 2 μs。因而，循环束流信号滞后垂直脉冲电源定时 5 μs, 垂直脉冲电源定时需要往后移动 5 μs。束流调试结果表明这种注入定时精确调节方法确实可行。

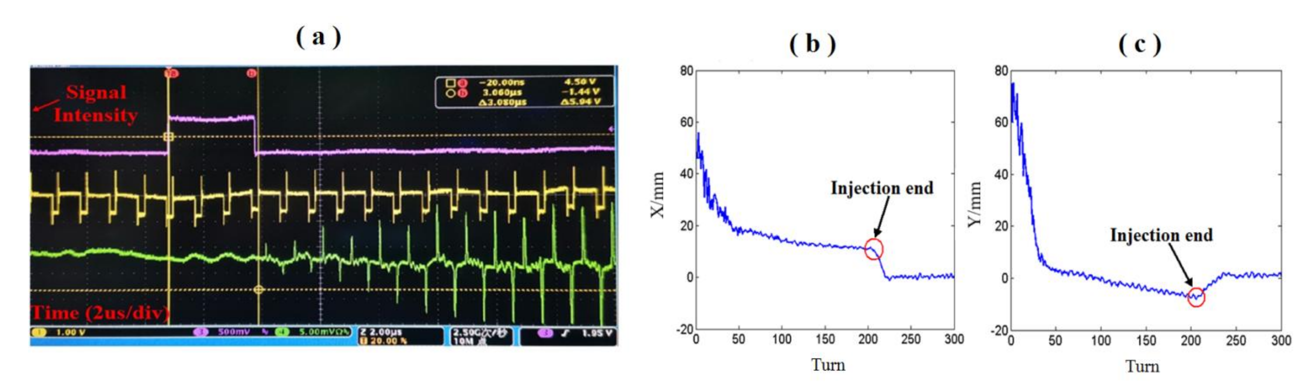


图 4 注入定时精确标定示意图。（a）粉线代表标准注入定时信号 T0，黄线代表 RCS 高频定时信号，绿线代表循环束流信号；（b）和（c）分别表示注入过程中由 R1BPM01 测量得到的循环束流水平和垂直的 TBT 数据

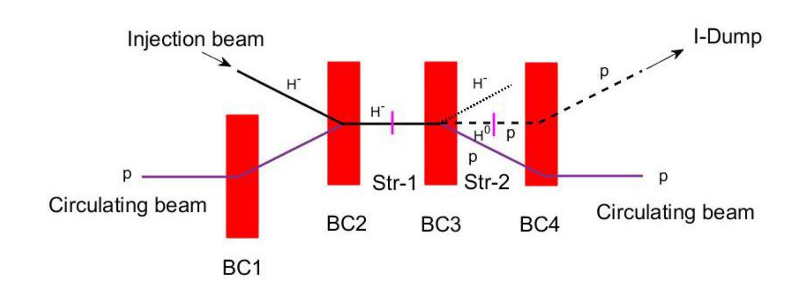


图 5 束流注入过程示意图

当注入束流和循环束流参数不匹配时，会导致大量束流损失和不可控发射度增长，因而需要进行注入参数精确匹配。注入参数匹配主要包括三个方面：*Twiss* 参数、色散函数和相空间坐标。图 5 给出了束流

注入过程中注入束流、循环束流和废弃束流的关系示意图。在物理设计中，注入区位于消色散的直线节上，且利用磁聚焦结构设计使得注入点处 α 函数接近 0，因而，*Twiss* 参数匹配和色散函数匹配都比较容易实现，并且在束流调试过程中得到证实[23]。对于相空间坐标匹配，基于多圈注入和傅立叶分析，我们提出了一种精确的注入相空间坐标匹配方法[24]，束流实验结果表明利用这种方法可以很好地抑制注入相空间坐标的不匹配现象。

3.2 反相关涂抹注入

对于 CSNS RCS，注入系统采用反相关涂抹作为设计方案。在束流调试过程中，采用反相关涂抹方案，通过对注入束流参数、涂抹范围、涂抹曲线、横向耦合效应进行详细地优化后，注入束流损失得到了很好的控制，注入效率超过 99%。结合其他方面的束流调试和优化，打靶束流功率超过设计值的 50%，并实现加速器稳定运行[23]。

在涂抹范围优化过程中，我们发现实际最优水平涂抹范围与设计值基本一致，但是实际最优垂直涂抹范围比设计值小很多。经过深入的分析和研究，造成实际垂直涂抹范围变小的主要原因有两个：（1）由于 BH3 陶瓷真空盒实际孔径（150 mm）比设计值（163 mm）小很多，导致实际垂直涂抹面积只有理论设计值的 70%；（2）在实际工作点（4.81, 4.87）下，水平固定凸轨磁铁的边缘聚焦效应导致束流感受到的实际垂直涂抹范围比置入值增加 25%，如图 6 所示。如果将 BH3 陶瓷真空盒孔径恢复到设计值，并考虑凸轨磁铁边缘聚焦效应影响，实际涂抹范围可达约 24 mm，正好与理论设计垂直涂抹范围完全吻合。

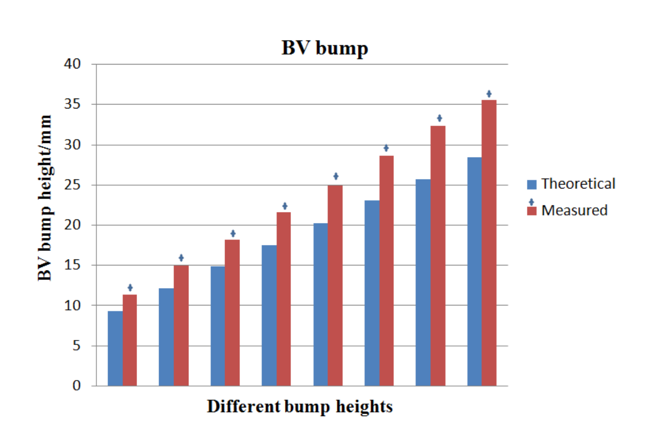


图 6 BV 凸轨高度的置入值和实测值比较

在涂抹注入调试过程中，研究发现注入凸轨磁铁边缘聚焦效应对涂抹效果和束流动力学的影响非常大。对于 CSNS RCS，由于涂抹凸轨 BH 和 BV 作用时间很短、凸轨角度较小，它们磁铁边缘聚焦效应的影响要远小于水平固定量凸轨 BC，因而本文主要研究水平固定量凸轨 BC 磁铁边缘聚焦效应对涂抹效果和束流动力学的影响。首先，由于固定量凸轨磁铁分布为非四折对称，因而其边缘聚焦效应会破坏 RCS 磁聚焦结构的四折对称性，进而导致发射度大幅增长。图 7 给出了固定量凸轨 BC 磁铁边缘聚焦效应对束流发射度（99.9%）的影响，从图中可以看出由于 RCS 四折对称性被破坏，水平和垂直发射度大幅度增长。其次，

固定量凸轨磁铁边缘聚焦效应会影响涂抹凸轨高度，进而影响涂抹范围，特别是在不同工作点模式下，固定量凸轨磁铁边缘聚焦效应导致涂抹凸轨高度的变化系数差别巨大。图 8 给出了固定量凸轨 BC 磁铁边缘聚焦效应对垂直涂抹凸轨 BV 高度的影响，从图中可以看出固定量凸轨 BC 的磁铁边缘聚焦效应导致实际垂直涂抹凸轨 BV 高度比置入的理论值变化很大。最后，固定量凸轨磁铁边缘聚焦会造成涂抹凸轨泄露，进而导致对全环闭合轨道的影响。图 9 给出了固定量凸轨 BC 磁铁边缘聚焦效应对全环闭合轨道的的影响，从图中可以看出固定量凸轨 BC 磁铁边缘聚焦效应造成 BV 凸轨泄露，进而导致全环闭合轨道很大，最大可达十几毫米。

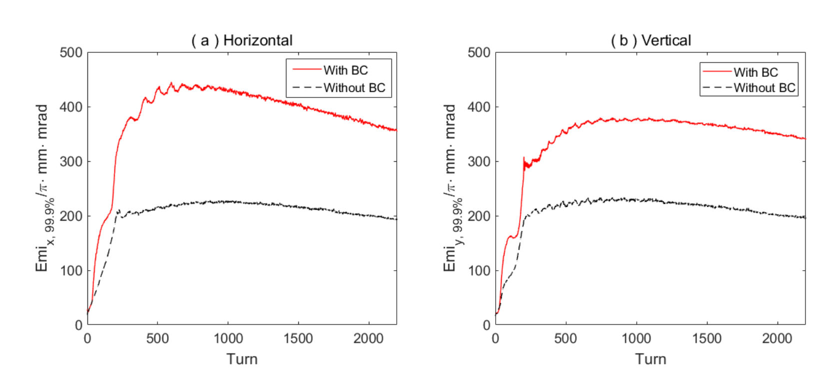


图 7 固定量凸轨 BC 磁铁边缘聚焦效应对束流发射度（99.9%）的影响。左图：水平；右图：垂直

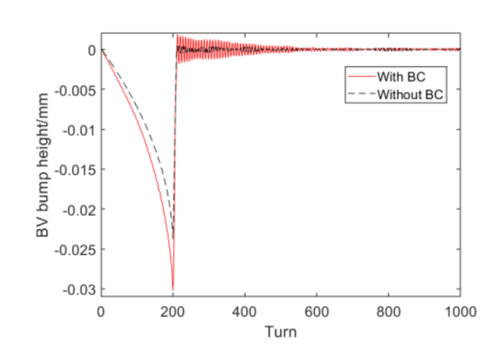


图 8 固定量凸轨 BC 磁铁边缘聚焦效应对垂直涂抹凸轨 BV 高度的影响

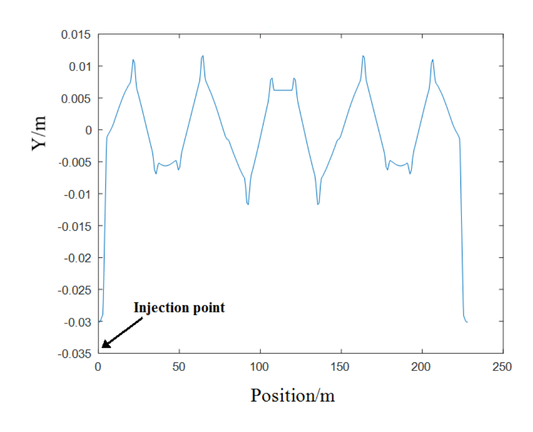


图 9 固定量凸轨 BC 磁铁边缘聚焦效应对全环闭合轨道的影响

为了解决固定量凸轨磁铁边缘聚焦效应对涂抹效果和束流动力学的影响，可以采取多种对应处理方法。首先，为了缓解固定量凸轨磁铁边缘聚焦效应破坏 RCS 磁聚焦结构的四折对称性、进而导致发射度大幅增

长，可以在 RCS 上增加一组（16 块或 24 块）交流校正四极铁来校正 RCS 四折对称性的破坏，进而减少发射度的增长。同时，可以将固定量凸轨磁铁（直流型）更改为交流型磁铁，减少边缘场的持续作用时间，进而减少发射度的增长。其次，对于固定量凸轨磁铁边缘聚焦效应导致实际垂直涂抹凸轨 BV 高度与置入理论值差别很大的问题，由于同一个工作点下凸轨高度变化系数是固定的，所以可以通过乘以这个系数来修正置入理论值与实际值的差异。最后，对于固定量凸轨磁铁边缘聚焦造成垂直涂抹凸轨泄露、进而大幅影响全环闭合轨道的问题，可以将原来垂直涂抹凸轨磁铁 BV 单一电源方案修改为双电源方案（BV2 和 BV3 共用一个电源，BV1 和 BV4 共用一个电源）来保证局部凸轨的闭合。

3.3 在反相关涂抹机械结构基础上实现相关涂抹的方法

采用反相关涂抹，CSNS 束流功率于 2019 年 1 月成功达到 50 kW，但之后经过多轮长期集中束流调试，均无法实现进一步提高束流功率的目标，主要包括：涂抹后束团全尺寸偏大、束流分布不均匀、强横向耦合效应等一系列严重困难，导致束流损失过大，难以达到更高功率稳定运行的要求。为了解决这些问题，经过深入地分析、模拟和测试后，我们提出在反相关涂抹机械结构基础上实现相关涂抹的新方法，详细研究结果请查阅参考文献[25]。该方法被成功应用于 CSNS RCS 束流调试，解决了在高功率束流调试过程中碰到的诸多困难[25]。结合其他方面的优化，打靶束流功率最终达到设计指标 100 kW，并实现加速器稳定运行。

4 同时实现相关和反相关涂抹的新注入方案

根据 CSNS 加速器束流调试经验，由于相关和反相关涂抹各具特点，如果在初始设计阶段只选择单一固定的涂抹方式，那么所选择的涂抹方式并不一定能满足未来机器的真实束流状态，进而影响加速器运行，甚至可能造成无法达到验收指标。因而，我们需要寻找同时实现相关和反相关涂抹的新注入方案，这样就可以按照建成之后加速器真实束流状态切换涂抹方式，避免由于初始设计时选择不合适的涂抹方式造成诸多故障，进而以最快的方式达到加速器各项设计指标。

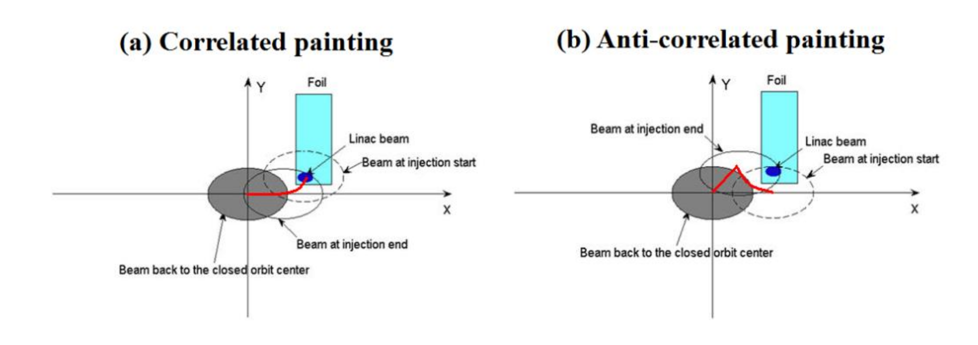


图 10 RCS 接收度椭圆和注入束流的关系示意图

经过深入研究，参考了美国散裂中子源现用涂抹方案（相关涂抹）[2]和上小节提到的在反相关涂抹机械结构基础上实现相关涂抹的方法[25]，我们提出了一种同时实现相关和反相关涂抹的新注入方案。该注入

方案以相关涂抹方法为设计基础，兼顾反相关涂抹方法。对于相关涂抹，在水平和垂直方向上均采用脉冲电流下降曲线进行涂抹；对于反相关涂抹，在水平方向上采用脉冲电流下降曲线进行涂抹，在垂直方向上采用脉冲电流上升曲线进行涂抹。图 10 给出了 RCS 接收度椭圆和注入束流的关系示意图。从图中可以看出：对于相关涂抹，在注入开始时，RCS 循环束流轨道在水平和垂直方向都是与注入点重合，与正常循环束流轨道中心的偏离最大，涂抹在相空间接收度的中心区域；在注入接近完成时，RCS 循环束流轨道在水平和垂直方向都是远离注入点，涂抹在相空间接收度的外围区域。对于反相关涂抹，在注入开始时，RCS 循环束流轨道在水平方向是与注入点近似重合，与正常循环束流轨道中心的偏离最大，而在垂直方向上远离注入点，水平方向涂抹在相空间接收度的中心区域，而垂直方向涂抹在相空间接收度的外围区域；在注入接近完成时，循环束流轨道在水平方向是远离注入点，但在垂直方向上与注入点重合，水平方向涂抹在相空间接收度外围区域，而垂直方向涂抹在相空间接收度的中心区域。因而，对于相关涂抹，在水平和垂直方向上都是从中心往边缘涂抹；对于反相关涂抹，在水平和垂直方向上分别是从中心往边缘涂抹和从边缘往中心涂抹。

对于相关涂抹，涂抹束流中心相对于循环束流闭合轨道的水平和垂直偏移可以分别表示为

$$x = x_{\max} - (x_{\max} - x_{\min}) \times \sqrt{\frac{t}{T_{\text{inj}}}}, \quad x' = 0, \tag{1}$$

$$y = y_{\max} \times \left[1 - \sqrt{\frac{t}{T_{\text{inj}}}}\right], \quad y' = 0, \tag{2}$$

其中， $x_{\max} - x_{\min}$ 是水平涂抹范围，$y_{\max}$ 是垂直涂抹范围，T_{inj} 是注入时间。对于反相关涂抹，涂抹束流中心相对于循环束流闭合轨道的水平和垂直偏移位置可以分别表示为

$$x = x_{\max} - (x_{\max} - x_{\min}) \times \sqrt{\frac{t}{T_{\text{inj}}}}, \quad x' = 0, \tag{3}$$

$$y = y_{\max} \times \left[1 - \sqrt{1 - \frac{t}{T_{\text{inj}}}}\right], \quad y' = 0. \tag{4}$$

不管相关涂抹还是反相关涂抹，直线加速器束流的注入点都设置在 $(x_{\max}, y_{\max})$，而且其在注入过程中保持不变。

表 1　CSNS-II 加速器注入束流参数

注入束流参数	参数值
注入能量 (GeV)	0.3
平均束流流强 (μA)	312.5
每个脉冲粒子数	7.8×10^{13}
重复频率 (Hz)	25
注入束流功率 (kW)	94
注入束流脉宽 (μs)	500
切束率	50%

Py-ORBIT 为国际上通用的强流质子同步加速器多粒子模拟跟踪程序，模拟结果被多个实验室所验证[26-27]。以 CSNS-II 加速器注入束流参数为基础，如表 1 所示，利用 Py-ORBIT 对新注入方案的相关和反相关涂抹过程进行详细模拟，结果表明相关和反相关涂抹的束流损失、发射度和束流分布均符合加速器稳定运行要求。图 11 和 12 分别给出相关和反相关涂抹注入完成后束流分布图。因而，新注入方案可以同时实现相关和反相关涂抹注入。

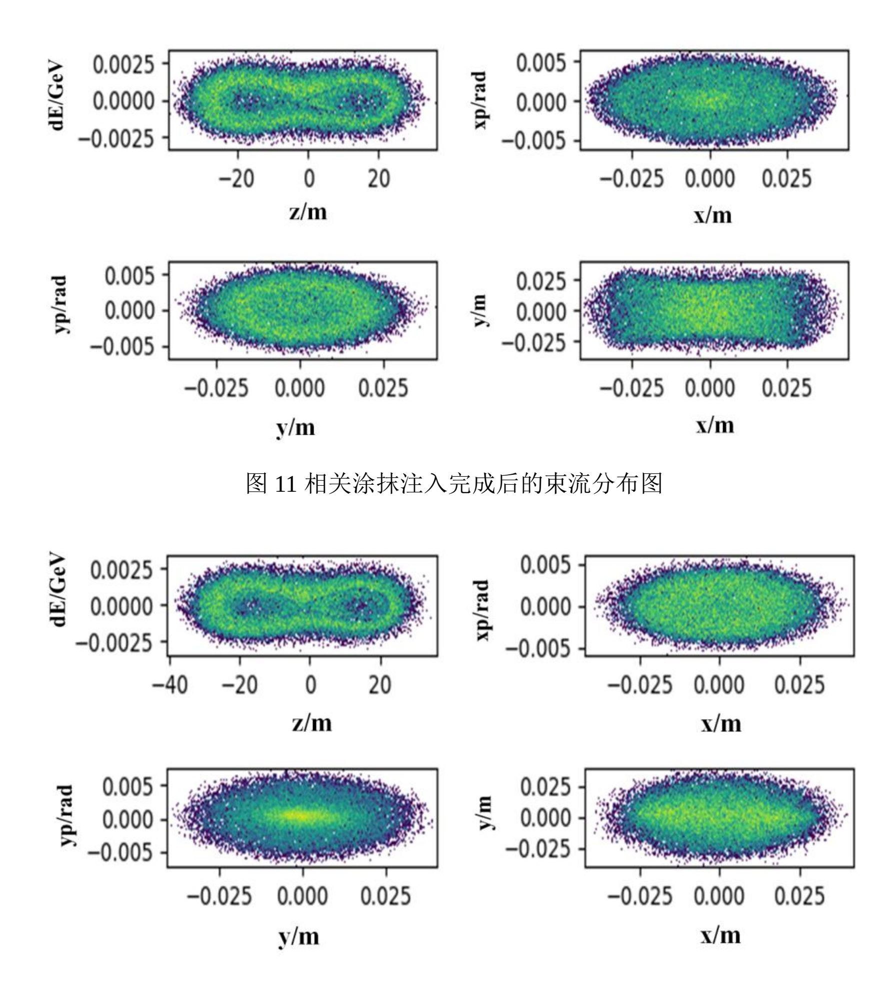


图 11 相关涂抹注入完成后的束流分布图

图 12 反相关涂抹注入完成后的束流分布图

5　总结和展望

本文对强流质子同步加速器横向相空间涂抹的方法和实现方式进行深入研究和探讨。基于 CSNS 注入系统，对束流注入过程中注入定时标定和注入参数匹配进行深入研究，发展了一种注入定时精确标定方法和一种注入相空间坐标精确匹配方法。其次，对反相关涂抹设计方案进行详细研究，找到实际垂直涂抹范围变小的原因，并利用模拟和束流实验深入研究固定量凸轨磁铁边缘聚焦效应对束流发射度、垂直凸轨高度和全环闭轨的影响。同时，简单介绍了在反相关涂抹机械结构基础上实现相关涂抹的方法及其对实现 CSNS 设计指标起到的关键作用。

由于相关涂抹和反相关涂抹各自具有特点，如果在初始设计阶段只选择单一固定的涂抹方式，那么所选择的涂抹方式并不一定能满足未来机器真实束流状态，进而影响加速器运行，甚至可能造成无法达到验

收指标。因而，本文提出了一种同时实现相关和反相关涂抹的新注入方案，并对其进行详细地论证、模拟和优化。采用新涂抹注入方案，加速器可以按照建成之后真实束流状态切换涂抹方式，避免由于初始设计时选择不合适的涂抹方式造成的诸多故障，进而以最快的方式达到加速器各项设计指标。新涂抹注入方案同样可以应用于国际国内其他同类加速器中，在给定注入设计方案下，实现相关和反相关涂抹的切换。

致谢 感谢中国科学院高能物理研究所东莞研究部刘华昌、张玉亮、齐欣、李晓、张文庆、邓昌东、卢晓含、李勇、李志平、朱鹏、徐智虹及中国散裂中子源其他同事在研究过程中的有益讨论和帮助。

参考文献：

[1] WEI Jie. Rev Mod Phys, 2003, 75: 1383-1432. doi: 10.1103/RevModPhys.75.1383

[2] HENDERSON S, ABRAHAM W, ALEKSANDROV A, et al. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A, 2014, 763: 610-673. doi: 10.1016/j.nima.2014.03.067

[3] GALAMBOS J D, HOLMES J A, LEE Y Y, et al. Status of the SNS injection system[C]. Proceedings of the 6th European Particle Accelerator Conference. Stockholm, Sweden: EPS-AG, 1998: 341-343.

[4] High-Intensity Proton Accelerator Project Team. Accelerator Technical Design Report for High-intensity Proton Accelerator Facility Project[R]. JAERI Report No. JAERITech2003-044, 2003.

[5] NAITO F. Nuclear and Particle Physics Proceedings, 2016, 273: 181-187. doi: 10.1016/j.nuclphysbps.2015.09.023

[6] BOARDMAN B. Spallation Neutron Source: description of accelerator and target [R]. Rutherford Appleton Laboratory Report No. RL-82-006, 1982.

[7] FINDLAY D J S, ADAMS D J, BROOME T A, et al. ISIS Upgrades-A Status Report[C]. Proceedings of the 10th European Particle Accelerator Conference. Edinburgh, Scotland: EPS-AG, 2006: 935-939.

[8] CHEN Hesheng, MA Li, XI Jiwei, et al. China Spallation Neutron Source Feasibility Research Report[R]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2009 (in Chinese).
(陈和生，马力，奚基伟，等. 散裂中子源可行性研究报告[R]. 北京：中国科学院，2009.)

[9] WEI Jie, FU Shinian, TANG Jingyu, et al. Chin Phys C, 2009, 33(11): 1033-1042. doi: 10.1088/1674-1137/33/11/021

[10] WEI Jie, CHEN Hesheng, CHEN Yanwei, et al. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A, 2009, 600: 10-13. doi: 10.1016/j.nima.2008.11.017

[11] WANG Sheng, FANG Shouxian, FU Shinian, et al. Chin Phys C, 2009, 33(S-II): 1-3. doi: 10.1088/1674-1137/33/S2/001

[12] HUANG Mingyang, WANG Sheng, XU Shouyan. Preliminary Study on the Injection System Upgrade for CSNS-II[C]. Proceedings of the 10th International Particle Accelerator Conference, Geneva: JACOW, 2019: 2037-2039. doi:10.18429/JACoW-IPAC2019-TUPTS048

[13] HOLMES J A, DANILOV V V, GALAMBOS J D, et al. Phys Rev ST Accel Beams, 1999, 2: 114202. doi: 10.1103/PhysRevSTAB.2.114202

[14] COUSINEAU S, LEE S Y, HOLMES J A, et al. Phys Rev ST Accel Beams, 2003, 6: 034205. doi: 10.1103/PhysRevSTAB.6.034205

[15] WEI Jie, BEEBE-WANG J, BLASKIEWICZ M, et al. Injection choice for spallation neutron source ring[C]. Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference, New York: IEEE, 2001: 2560-2562.

[16] BEEBE-WANG J, LEE Y Y, RAPARIA D, et al. Transverse phase space painting for SNS accumulator ring injection[C]. Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference, New York: IEEE, 1999: 1743-1745.

[17] TAIT N R S, TOLFREE D W L, ARMITAGE B H, et al. Nuclear Instruments and Methods, 1979, 167: 21-24. doi: 10.1016/0029-554X(79)90469-5

[18] TAIT N R S, TOLFREE D W L, WHITMELL D S, et al. Nuclear Instruments and Methods, 1979, 163: 1-14. doi: 10.1016/0029-554X(79)90027-2

[19] HUANG Mingyang, XU Shouyan, LU Xiaohan, et al. Atom Energy Sci Technol, 2019, 53(9):1708–1714 (in Chinese).
doi: 10.7538/yzk.2019.53.09.1708
(黄明阳，许守彦，卢晓含，等. 原子能科学技术, 2012, 46(增刊): 530-533.)
[20] TANG Jingyu, QIU Jing, WANG Sheng, et al. Chin Phys C, 2006, 30(12): 1184-1189. doi: 10.1007/s10714-006-0346-6
[21] QIU Jing, TANG Jingyu, WANG Sheng, et al. Chin Phys C, 2007, 31(10): 942-946. doi: 10.1016/S1872-2040(07)60079-6
[22] HUANG Mingyang, WANG Sheng, QIU Jing, et al. Chin Phys C, 2013, 37(6): 067001. doi: 10.1088/1674-1137/37/6/ 067001
[23] HUANG Mingyang, XU Shouyan, AN Yuwen, et al. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A, 2021, 1007: 165408.
doi: 10.1016/j.nima.2021.165408
[24] LU Xiaohan, HUANG Mingyang, WANG Sheng. Phys Rev Accel Beams, 2018, 21: 062802.
doi: 10.1103/PhysRevAccelBeams.21.062802
[25] HUANG Mingyang, IRIE Y, XU Shouyan, et al. Phys Rev Accel Beams, 2022, 25: 110401.
doi: 10.1103/PhysRevAccelBeams.25.110401
[26] OSTIGUY J F, HOLMES J. PyORBIT: A Python shell for ORBIT[C]. Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference, New York: IEEE, 2003: 3503–3505.
[27] SHISHLO A, COUSINEAU S, HOLMES J, et al. Procedia Comput Sci, 2015, 51: 1272-1281. doi: 10.1016/j.procs.2015.05.312

Study on the painting injection methods for the high intensity proton synchrotron

HUANG Mingyang[1, 2, 3, 4 #], XU Shouyan[1, 2], WANG Sheng[1, 2]

(1. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523803, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Key Laboratory of Particle Acceleration Physics &Technology, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The space charge effect is the core problem of high intensity proton accelerator, especially at injection and initial acceleration stages. Using the phase space painting with optimized process, will effectively eliminate the influence of space charge effect on injection and acceleration efficiency, and emittance increase. Transverse phase space painting methods can be divided into correlated painting and anti-correlated painting. In this paper, firstly, the transverse phase space paintings for the high intensity proton synchrotron are discussed in detail, including different painting methods and different implementation methods. Secondly, based on the injection system of the China Spallation Neutron Source, the beam injection process and anti-correlated painting design scheme are studied in detail. The reasons for the reduction of the actual vertical painting range and the influence of edge focusing effects of the bump magnets on the painting and beam dynamics are deeply explored. In addition, the method to perform the correlated painting based on the mechanical structure of the anti-correlated painting scheme and its key role in realizing the CSNS design goal are briefly introduced. Finally, according to the requirement of switching between different painting methods online in future accelerators, a new injection scheme that can realize correlated and anti-correlated painting simultaneously has been proposed. The new painting injection scheme has been demonstrated, simulated and optimized in detail.

Key words: proton synchrotron; injection; painting; space charge effect

Received date: yyyy-mm-dd; **Revised date**: yyyy-mm-dd

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (12075134); Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2021B1515120021)

Corresponding author: HUANG Mingyang, E-mail: huangmy@ihep.ac.cn